

Комбинация методов сканирующей силовой микроскопии для определения электрофизических параметров индивидуальных многостенных углеродных нанотрубок

Д.В. Соколов¹, Н.А. Давлеткильдеев^{1,2}, В.В. Болотов¹, И.А. Лобов¹

¹*Омский научный центр СО РАН, 644024, Омск, Россия
classicsub-zero@mail.ru*

²*Омский государственный университет им. Ф.М. Достоевского, 644077, Омск, Россия*

Путем совместного использования методов электростатической силовой микроскопии и проводящей атомно-силовой микроскопии разработана методика определения электрофизических параметров индивидуальных многостенных углеродных нанотрубок.

Combination of scanning force microscopy methods to evaluation the electrophysical parameters of individual multiwalled carbon nanotubes

D.V. Sokolov¹, N.A. Davletkildev^{1,2}, V.V. Bolotov¹, I.A. Lobov¹

¹*Omsk Scientific Center SB RAS, 644024, Omsk, Russia*

²*F.M. Dostoevsky Omsk State University, 644077, Omsk, Russia*

Based on a combination of electrostatic force microscopy and conductive atomic force microscopy, the technique for determining the electrical parameters of individual multiwalled carbon nanotubes was developed.

Углеродные нанотрубки (УНТ), благодаря своим уникальным свойствам и морфологии, активно исследуются как перспективный материал для различных приложений [1]. Перспектива создания элементов электроники на индивидуальных УНТ определяет необходимость развития методов контроля их электрических характеристик. Большинство методов характеризации электрических свойств индивидуальных УНТ требует создания электрических контактов к нанотрубке. Зачастую это технологически сложная задача и позволяет получать результаты для ограниченного числа УНТ. Эффективными методами исследования электрических свойств индивидуальных УНТ являются методы сканирующей силовой микроскопии [2]. Комбинация нескольких взаимодополняющих методов позволяет получать полный набор электрофизических параметров УНТ.

На основе комбинации методов электростатической силовой микроскопии (ЭСМ) и проводящей атомно-силовой микроскопии (ПАСМ) исследованы электрические свойства индивидуальных многостенных УНТ, нелегированных и легированных азотом. Измерения выполнены на атомно-силовом микроскопе MFP-3D SA (Asylum Research) в среде сухого азота, а также в смеси сухого азота с газом-восстановителем (аммиак) и -окислителем (диоксид азота). Измерения в газовых средах выполнялись с целью выяснения эффектов адсорбции газов на изменение электрофизических параметров легированных УНТ.

Методом ЭСМ с использованием методики, описанной в работе [3], измерялась работа выхода электронов в индивидуальных УНТ (Рис. 1). На основе сравнения величин работы выхода в нелегированных и легированных УНТ определялся средний сдвиг уровня Ферми и рассчитывалась концентрация свободных носителей заряда в легированных УНТ. На основе измерения вольт-амперных характеристик, выполненных методом ПАСМ на структурах с золотыми контактами, определялось среднее значение продольного электрического сопротивления индивидуальных УНТ (Рис. 1). Далее с учетом морфологических параметров УНТ рассчитывались удельная проводимость и подвижность свободных носителей заряда в УНТ.

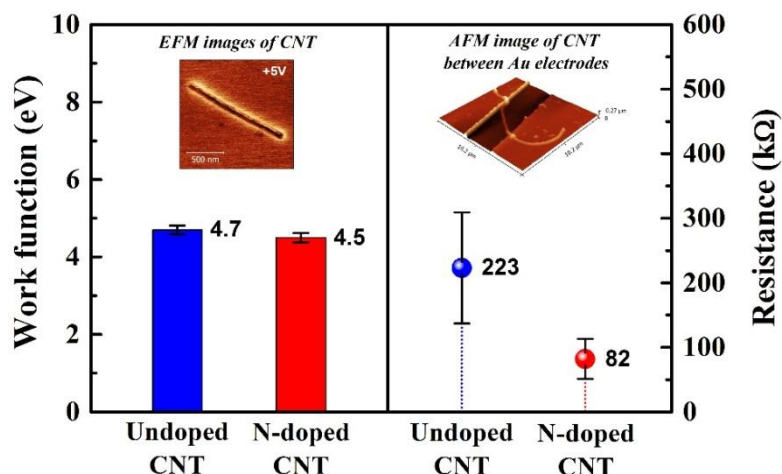


Рисунок 1. Средние работа выхода электрона (слева) и продольное электрическое сопротивление (справа) в нелегированных и легированных азотом УНТ.

С помощью разработанной методики исследовано изменение электрофизических параметров легированных азотом УНТ при адсорбции молекул газа-восстановителя (NH_3) и -окислителя (NO_2) в концентрации 1000 ppm (Рисунок 2).

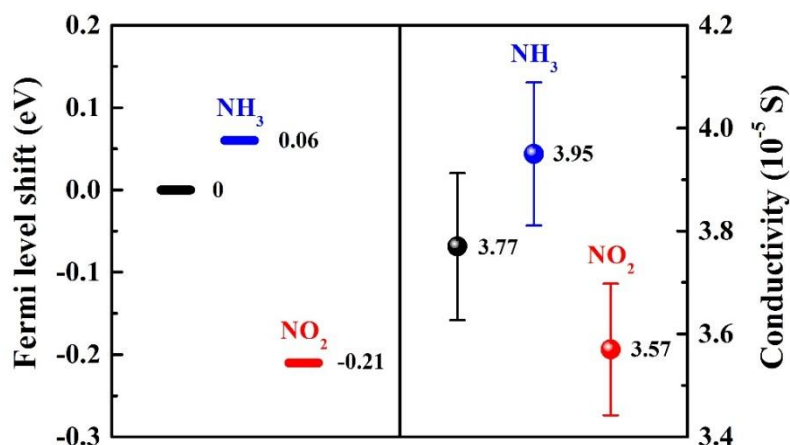


Рисунок 2. Средний сдвиг уровня Ферми (слева) и средние значения и разброс продольной электрической проводимости (справа) в индивидуальных легированных УНТ при адсорбции молекул аммиака и диоксида азота.

При адсорбции газа-восстановителя уровень Ферми в легированных УНТ незначительно возрастает (Рис. 2), что, может быть связано с наличием некоторого количества акцепторных дефектов в стенках УНТ. В случае адсорбции газа-окислителя уровень Ферми существенно снижается (Рис. 2), что указывает на доминирование в стенках исходных УНТ дефектов донорного типа, что соответствует типу легирующей примеси. Рост и спад средней величины проводимости УНТ (Рис. 2) коррелирует с увеличением и уменьшением положения уровня Ферми в результате изменения концентрации свободных электронов во внешних стенках МУНТ.

1. N. Yang, X. Chen, T. Ren, P. Zhang, D. Yang, *Sensor Actuat. B – Chem.* **207**, 690 (2015).
2. T. Mélin, M. Zdrojek, D. Brunel, *Scanning Probe Microscopy in Nanoscience and Nanotechnology*. (Ed. B. Bhushan. Berlin: Springer-Verlag Berlin Heidelberg), 89 (2010).
3. N.A. Davletkildееv, D.V. Stetsko, V.V. Bolotov, Yu.A. Stenkin et al., *Mater. Lett.* **161**, 534 (2015).